中国生态农业学报 2017 年 7 月 第 25 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2017, 25(7): 958−967

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160921

谢立勇, 许婧, 郭李萍, 徐玉秀, 孙雪, 赵洪亮, 郭飞, 赵迅. 水肥管理对稻田CH_4排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 958−967

Xie L Y, Xu J, Guo L P, Xu Y X, Sun X, Zhao H L, Guo F, Zhao X. Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 958−967

水肥管理对稻田 CH_4 排放及其全球增温潜势影响的评估*

谢立勇[1], 许 婧[1], 郭李萍[2], 徐玉秀[1], 孙 雪[1], 赵洪亮[1], 郭 飞[1], 赵 迅[1]

(1. 沈阳农业大学农学院 沈阳 110161; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 北京 100081)

摘 要: 甲烷(CH_4)是主要温室气体之一, 对全球增温的作用仅次于二氧化碳(CO_2)。稻田是CH_4的重要排放源, 减少稻田CH_4排放对减缓气候变暖具有直接效应。为此, 掌握稻田CH_4排放的规律和特征对控制和减少稻田CH_4排放尤为重要。为了解稻田温室气体排放的主要影响因子及影响程度, 估算稻田温室气体全球增温潜势, 寻求农田减排措施, 我们通过收集已发表的文献建立了稻田CH_4排放的数据库, 采用析因分析与回归分析方法对稻田CH_4日排放量和全球增温潜势特征和可能的影响因子进行了分析。结果表明, 稻田CH_4日排放量和增温潜势均随土壤有机质背景含量的升高而增加, 不同类型稻田CH_4日排放量大小依次为: 双季稻晚稻>双季稻早稻>单季稻>稻麦轮作晚稻; 晚稻田CH_4的增温潜势大于早稻田。不同肥料处理条件下, 稻田CH_4日排放量表现为: 秸秆还田>配施有机肥>化学氮肥≈生物炭。控制灌溉水量可降低稻田CH_4的综合增温潜势, 表现为: 持续淹水>晒田>干湿交替>控制灌溉。研究结果说明, 稻田CH_4的产生与排放过程受土壤有机质含量、肥料管理和水分管理以及轮作制度等多种因素的共同影响, 应依据不同土壤条件和种植制度, 适当调整肥水管理, 以减少稻田温室气体排放, 降低其增温潜势。

关键词: 稻田; 温室气体; 甲烷排放; 增温潜势; 土壤有机质; 水肥管理; 栽培制度
中图分类号: S162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)07-0958-10

Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential*

XIE Liyong[1], XU Jing[1], GUO Liping[2], XU Yuxiu[1], SUN Xue[1], ZHAO Hongliang[1], GUO Fei[1], ZHAO Xun[1]

(1. College of Agronomy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Methane (CH_4) is a key greenhouse gas, second only to CO_2 in term of contribution to global warming. Paddy field, as an important source of CH_4 emission, has significant implications for global warming and climate change. In order to understand the main factors of CH_4 emission in paddy fields and its impact on global warming, this study calculated potential global warming and sought measures to mitigate CH_4 emission in paddy fields. To do so, we collected data on CH_4 emission in paddy fields in China using literatures published before 2015 (including journals and doctoral and master dissertations) and documented in CNKI net, ScienceDirect and SpringLink. Then daily CH_4 emission, global warming potential (GWP) and as-

* 国家科技支撑计划"十二五"项目(2013BAD11B03)资助
谢立勇, 主要从事气候变化与低碳农业研究。E-mail: xly0910@163.com
收稿日期: 2016-12-10 接受日期: 2017-03-07

* This study was founded by the National Key Technology Research & Development Program of China (2013BAD11B03).
Corresponding author, XIE Liyong, E-mail: xly0910@163.com
Received Dec. 10, 2016; accepted Mar. 7, 2017

sociated factors influencing CH_4 emission in paddy fields in China were analyzed using regression and factorial analyses. The results showed that daily emission of CH_4 in paddy field and GWP due to CH_4 emission increased with increasing soil organic matter (SOM). The order of daily CH_4 emission from paddy field was: late paddy field of double cropping rice > early paddy field of double cropping rice > single cropping paddy field > late paddy field of rice-wheat rotation. GWP due to CH_4 emission in late paddy field was more than that in early paddy field for double cropping rice. The order of daily CH_4 emission from paddy fields with different fertilizer managements was: ST (straw turnover) > NO (chemical nitrogen fertilizer with organic manure) > NF (chemical nitrogen fertilizer) ≈ BI (biochar). Water management significantly affected CH_4 emission from paddy fields with the order of continuous flooding (CF) > field drying (FDF) > flooding-drying alternation (FD) > control irrigation (CI). Proper water management also significantly reduced GWP due to CH_4 emission. The order of GWP due to CH_4 emission in early paddy fields, late paddy fields and single cropping rice paddy fields was also as follows: CF > FDF > FD > CI. The results suggested that CH_4 emission was influenced by many factors, including soil SOM content, water and fertilizer management, and basic soil conditions. However, agricultural management activities (e.g., water and fertilizer management, fertilizer amount, fertilizer type) played a major role in CH_4 emission in agricultural lands. This was influenced by soil nutrient conditions (soil SOM content and C∶N ratio), climatic conditions (crop growth period, temperature and precipitation during growth period), management practices (fertilizer and water management), rotation system, and other factors. For a more accurate inventory of greenhouse gas emission and proposal of effective mitigation policies, it was critical to use appropriate practices suitable to specific climatic, soil and cropping conditions, combined with rational nitrogen fertilizer application rate and water management.

Keywords: Paddy field; Greenhouse gases; Methane (CH_4) emission; Global warming potential; Soil organic matter; Water and fertilizer management; Cropping system

甲烷(CH_4)是三大温室气体之一，对全球增温的作用仅次于二氧化碳(CO_2)。稻田是 CH_4 的重要排放源，其排放量约占大气 CH_4 总排放量的 15%[1]。根据中华人民共和国气候变化第 2 次国家信息通报[2]，2005 年中国农业 CH_4 排放占 CH_4 总排放量的 56.6%，而稻田 CH_4 排放占农业 CH_4 总排放量的 31.5%。我国水稻种植面积约占耕地总面积的 25%，占世界水稻总种植面积的 20%左右。因此减少稻田 CH_4 排放对减缓气候变化非常重要。稻田 CH_4 是土壤中有机物在严格厌氧条件下分解产生的，是一个非常复杂的过程[3]，既受到土壤理化性质、气候条件的影响，也受到耕作制度、水稻品种和田间管理措施的影响[4]。CH_4 产生主要包括产酸和不产酸两个途径，前者在专性矿质营养产 CH_4 菌的参与下，以 H_2 或有机分子还原 CO_2 或直接利用甲酸和 CO 形成 CH_4；后者在甲基营养产 CH_4 菌的参与下，对含甲基的简单化合物进行脱甲基作用产生 CH_4，这一途径约占 70%左右，是产生 CH_4 的主要途径。稻田 CH_4 产生后通过 3 种途径向大气中传输：一是分子扩散作用排放；二是气泡传输方式排放；三是植物通气组织传输排放[5]。其中，植株体排放是稻田 CH_4 排放的主要途径[6]。水稻根系具有较强的输送 CH_4 能力，约 80%的 CH_4 通过水稻植株的通气组织传向大气[7-8]。

影响稻田 CH_4 排放的主要因素包括土壤温度、土壤 pH、水分管理、肥料施用等。土壤温度直接影响有机质分解、土壤微生物活性、CH_4 的产生和向大气圈传输的速率。产生 CH_4 微生物活动的最适宜温度为 35~37 ℃，在水稻生育期内，CH_4 日排放通量变化与土壤温度日变化相一致[9]。土壤 pH 主要影响土壤有机质的分解速率和产 CH_4 菌的活性，土壤 pH 呈中性利于土壤 CH_4 的产生。当 pH<5.75 或 pH>8.75，产 CH_4 菌活动受到抑制，CH_4 排放大大减少甚至不排放[10]。土壤有机质含量高的淹水稻田中产 CH_4 菌活性也较高，CH_4 排放较多，CH_4 排放量与土壤有机质含量呈显著正相关[11-12]。灌溉方式及稻田水面厚度也影响稻田 CH_4 排放。浅水灌溉会减少 CH_4 排放，灌溉水深在 10 cm 以内时，CH_4 排放通量随灌水深度增加而增加[13]。与持续淹水相比，中期晒田可以减少 36%~65%以上的 CH_4 排放[14-16]，间歇性灌水能够减少 32%~93%的 CH_4 排放[17-19]。在不同水分管理下，稻田 CH_4 和 N_2O 排放存在明显的消长关系[20]。在减少 CH_4 排放的同时，往往导致 N_2O 排放的增加[8]，而 N_2O 的温室效应又远高于 CH_4[9]。因此，在改变水分管理措施减排 CH_4 时，还需关注 N_2O 的排放以及两者协同效应。氮肥通过影响其他因素而间接影响 CH_4 排放。增加氮肥用量可以抑制稻田 CH_4 的排放[21]。稻田施氮水平从低氮到中氮，CH_4 排放降低幅度最大，从中氮到高氮变化不明显[22]。施用尿素比硝酸铵和硫酸铵排放的 CH_4 多[23]。秸秆和绿肥还田显著增加稻田 CH_4 排放量，并随还田量的增加而增加[24]。此外，施用未腐熟的农家肥、粪渣等增加稻田 CH_4 的排放，而发酵过的

沼渣沼液能够减少 CH_4 排放[21]。化肥和有机肥混施能有效减少 CH_4 排放且不影响产量，是减少稻田 CH_4 排放的有效手段之一。

稻田 CH_4 排放的测定或监测数据比较多，中国稻田 CH_4 排放具有明显的地域性分布规律，以西南地区的排放通量最高，平均达 16.8 $mg(CH_4)\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$；长江中下游地区次之；华北和华南地区偏少；东北稻作区排放通量最低[25]。在水稻整个生长期 CH_4 排放峰值出现在返青期和分蘖期。为方便估算稻田温室气体排放，本文采用收集已发表文献的方法建立数据库[25]；针对不同种植制度的稻田(双季稻早稻、双季稻晚稻、典型单季稻及稻麦轮作)，对不同管理措施下的稻田 CH_4 排放进行析因分析，探索稻田 CH_4 排放的主要影响因子及影响程度，并对不同水分管理措施下温室气体排放的综合全球增温潜势进行分析，为估算稻田 CH_4 排放、制定合理的稻田温室气体减排策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

利用文献数据库(中国知网、万方数据库、中文科技期刊数据库、ScienceDirect 和 SpringLink 等)对 2015 年以前发表的关于中国稻田 CH_4 排放的国内外期刊及硕、博士论文进行检索，输入关键词如“CH_4 排放”、“甲烷”、“水分管理”和“肥料管理”等获得相关文献。

1.2 数据库构建

用 Excel 表格进行数据输入并分层归类，数据库中原始数据包括如下信息：文献信息(作者、时间、文献原始出处)、试验地信息(试验地点、土壤类型、土壤质地、pH、土壤有机质、总氮、黏粒含量、作物类型、生育期时间)、水肥管理(灌溉与否、灌溉方式、是否晒田、施肥方式、施肥量、氮肥类型及用量)、稻田 CH_4 日排放量、全球增温潜势等。氮肥施入量统一换算为 $kg(N)\cdot hm^{-2}$；稻田 CH_4 的日排放量单位分别为 $kg(CH_4)\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$，全球增温潜势(global warming potential, GWP)单位为 $kg(CO_2\text{-}e)\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$。

GWP 是某一给定物质在一定时间积分范围内与 CO_2 相比而得到的相对辐射影响值，是为了评价各种温室气体对气候变化影响的相对能力参数。全球增温潜势是评价不同温室气体之间温室效应的衡量指标。依据 IPCC 温室气体清单方法学[26]，100 年基础上 CH_4 的 GWP 计算公式如下：

$$GWP=累计排放量\times 25$$

1.3 数据分析

为确保数据具有代表性，所建数据库文献筛选需满足以下几个条件：1)收集的数据均来自大田试验；2)标明试验时间、地点、试验地土壤理化性状、试验设计和田间管理等基本信息；3)CH_4 和 N_2O 气体的采样方法科学，观测时间至少为某一作物的完整生育期。

对数据库中的数据进行亚组分层(表 1)。由于不同稻作制度生育期长短及土壤性质、生育期温度等不同，稻田 CH_4 排放量和增温潜势也有所不同。稻田 CH_4 排放主要是有机物质或有机物质在淹水条件下分解产生的，因此在考虑各种处理对 CH_4 排放的影响时，按照土壤有机质含量进行分层归类(肥料处理下土壤有机质按照≤25 $g\cdot kg^{-1}$ 和>25 $g\cdot kg^{-1}$ 分层，水分处理下土壤有机质按照≤30 $g\cdot kg^{-1}$ 和>30 $g\cdot kg^{-1}$ 分层)；在此基础上再将稻田分为早稻田、晚稻田和单季稻稻田，将稻田 CH_4 和 N_2O 排放依据肥料类型、土壤改良剂和水分管理几个因素再进行亚组分析，并根据稻田 CH_4 在肥料处理和水分处理中的排放规律分别对土壤有机质(SOM)进行亚组分层以进行析因分析；对 GWP 进行汇总分析，分析其可能的影响因子。

化肥包括尿素和复合肥，有机肥主要是混有泥土或秸秆的动物粪便，秸秆还田是指上一季的小麦和水稻秸秆全部还田或一半还田，生物炭是用秸秆等农作物废物在缺氧条件下高温碳化形成的生物炭。持续淹水即整个生长季始终保持淹水状态，直至收获前一周排水落干；晒田是插秧后淹水，分蘖期末期排水晒田，复水后保持淹水状态，直至收获前 1~2 周排水落干；干湿交替是插秧后淹水，分蘖期末期排水晒田，复水后采取干湿交替管理方式，直至收获前 1~2 周排水落干；控制灌溉就是整个生育期采取不间断的干湿交替灌溉模式，或保持田间湿润状态。

对于文献中的一些异常数据，首先采用经验法去除，参照已有文献报道及理论分析规定上限值和下限值，把高于上限和低于下限 100%的数据直接去除。其次，利用 SPSS 软件的统计学功能设置 95%置信区间，箱图上、下限以外的点属于异常值适当剔除。中值更能代表一组数据的平均水平，因此选取每组数据的中值代表此组数据。最终实际使用 336 条文献数据，分布于全国 66 个站点。使用 Excel 软件进行数据分析和做图。

表 1　稻田 CH_4 排放条件分类

Table 1　Classification of affecting factors of CH_4 emission from paddy fields

管理方式 Management mode	亚组 Sub-group	亚组说明 Sub-groups description
肥料类型(土壤改良剂) Fertilizer type (Soil conditioner)	NF	单施化肥 Nitrogen fertilizer
	NO	化肥+有机肥 Nitrogen fertilizer with organic manure
	SF	秸秆还田 Straw turnover
	BI	生物炭 Biochar
水分管理 Water management	CF	持续淹水 Continues flooding
	FDF	晒田 Paddy field drying
	FD	干湿交替 Flooding-drying alternation
	CI	控制灌溉 Control irrigation

2　结果与分析

2.1　肥料管理对稻田 CH_4 排放的影响

2.1.1　对早稻田 CH_4 排放的影响

我国早稻种植区主要集中在江苏、浙江、安徽、湖南、湖北及两广地区，早稻一般在 3 月底至 4 月上旬育秧，4 月下旬至 5 月上旬插秧，7 月中下旬收获，生育期 85~100 d。本文收集到的早稻田 CH_4 排放数据主要是双季稻中的早稻，氮肥施用量 100~300 kg(N)·hm^{-2}。

稻田 CH_4 排放不仅受到土壤有机质(SOM)背景含量的影响，施用或配施不同类型的肥料，稻田 CH_4 排放也存在差异(图 1)。当 SOM≤25 g·kg^{-1} 时，仅施用化学氮肥的早稻田 CH_4 日排放量中值为 1.61 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，配施有机肥的 CH_4 日排放量中值为 1.83 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，而化肥结合秸秆还田处理下 CH_4 日排放量中值有明显增加，达 2.49 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}。随着土壤有机质含量增加，CH_4 排放呈现增加趋势：当 SOM>25 g·kg^{-1} 时，配施有机肥和秸秆还田两个处理的 CH_4 日排放量比 SOM≤25 g·kg^{-1} 时分别增加 0.45 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1} 和 0.96 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，增加幅度达 24%和 39%；而不同 SOM 背景条件下施用氮肥对早稻田 CH_4 排放没有显著变化。此外，收集到的数据中有一些施用生物炭改良剂(这些试验条件中的 SOM 背景值均大于 25 g·kg^{-1}, n=8)，数据分析显示施用生物炭，CH_4 日排放量中值为 1.02 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，明显低于其他施肥方式。

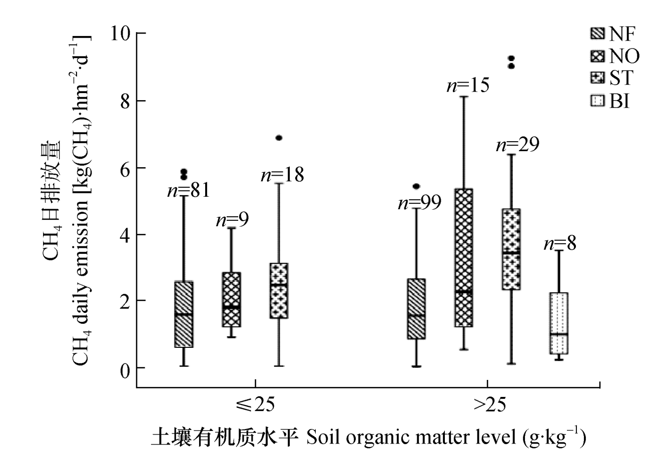


图 1　早稻田肥料管理方式对不同土壤有机质水平的稻田 CH_4 日排放量的影响

Fig. 1　Effect of fertilizer management on CH_4 daily emission from early paddy field with different soil organic matter levels

2.1.2　对晚稻田 CH_4 排放的影响

晚稻主要包括双季稻的晚稻和水旱轮作的晚稻，一般于 6 月中下旬育秧，7 月中下旬插秧，10 月下旬至 11 月上旬收获，生育期 105~130 d，水稻生产中比较重视晚稻的管理，因为晚稻对水稻产量的贡献份额较大。

双季稻晚稻种植区域与早稻种植区域大致相同，与早稻相比较，晚稻稻田 CH_4 排放量整体偏高(图 2 和表 2)。在施用化肥、配施有机肥和秸秆还田几种处理下，双季稻晚稻稻田 CH_4 日排放量呈现递增的趋势。SOM 背景值≤25 g·kg^{-1} 情况下，CH_4 日排放量中值分别为 2.44 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}、2.98 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1} 和 3.80 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}；与单施化肥处理相比，配施有机肥和秸秆还田处理双季稻晚稻田 CH_4 日排放量分别增加 22%和 56%；在 SOM 背景值>25 g·kg^{-1} 情况下，各肥料处理 CH_4 日排放量中值略低，但施用生物炭则显著降低双季稻晚稻稻田 CH_4 排放，其日排放量中值为 1.02 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}。

稻麦轮作是长江中下游典型的轮作种植模式。由于水旱轮作改变了稻田持续淹水状况，使得一些冷浸田等持续淹水稻田的不良性状得到改善。此外，稻田排水种植冬小麦能抑制稻田产 CH_4 菌的活动，从而有效减少 CH_4 的产生和排放。由图 2b 可以看出，稻田 CH_4 日排放量中值普遍低于 2 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}。SOM 背景值≤25 g·kg^{-1} 时，单施化肥和添加生物炭条件下，CH_4 日排放量中值为 0.55 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1} 和 0.51 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，配施有机肥和秸秆还田处理下 CH_4 日排放量中值为 0.99 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1} 和 1.82 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}。在 SOM 背景值>25 g·kg^{-1} 条件下，各肥料处理的 CH_4 日排放量中值均高于低 SOM 背景的排放，其中单施化肥处理的差异较大。CH_4 日排放量大小依次为秸秆还田>配施有机肥>单施氮肥>添加生物炭，且添加生物炭可使 CH_4 日排放量显著降低。

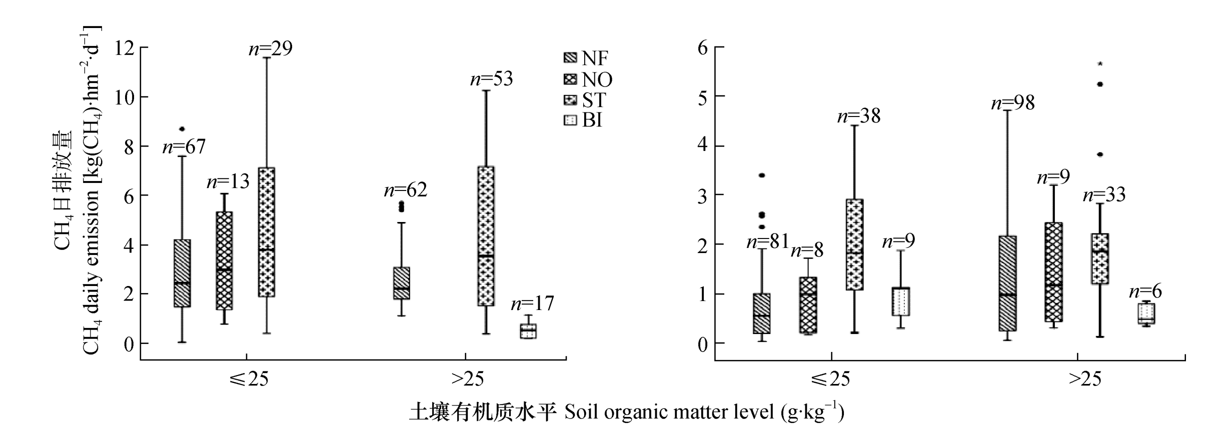


图 2　肥料管理对不同土壤有机质水平的双季稻晚稻田(a)和水旱轮作晚稻田(b)CH_4日排放量的关系

Fig. 2　Effect of fertilizer management on CH_4 daily emission from late paddy field of double cropping rice (a) and rice-wheat rotation (b) with different soil organic matter levels

2.1.3　对单季稻稻田 CH_4 排放的影响

单季稻稻作区主要分布在东北、华北和西北部分地区，育秧时间一般在清明节前后，4 月下旬至 5 月上旬大田移栽，9 月下旬至 10 月上旬收获，生育期 120~150 d。不同肥料类型对单季稻稻田 CH_4 排放有显著影响(图 3)，SOM 背景值≤25 g·kg^{-1}时，单施化肥处理的 CH_4 日排放量中值为 0.78 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，配施有机肥和秸秆还田处理显著增加 CH_4 排放量，日排放量分别增加 97%和 283%，施用生物炭使 CH_4 排放降低了 46%。在 SOM 背景值>25 g·kg^{-1}情况下，不同处理的 CH_4 日排放量中值分别为 1.08 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}(单施化肥)、2.70 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}(配施有机肥)、6.19 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}(秸秆还田)和 0.93 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}(添加生物炭)，CH_4 日排放量的差异更为显著。

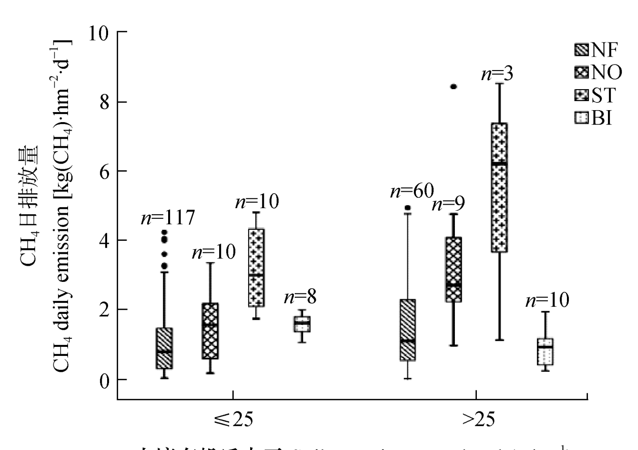


图 3　单季稻稻田肥料管理对不同有机质水平稻田 CH_4 日排放量的影响

Fig. 3　Effect of fertilizer management on CH_4 daily emission from single cropping rice field with different soil organic matter levels

不同类型稻田在各肥料类型及土壤改良剂条件下的 CH_4 日排放量表现出较大差异(表 2)。双季稻的早稻田 CH_4 日排放量为 1.02~3.45 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，双季稻的晚稻田和稻麦轮作的晚稻田 CH_4 日排放量分别为 0.52~3.80 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1} 和 0.48~1.86 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，单季稻稻田 CH_4 日排放量为 0.78~6.19 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}，稻田 CH_4 日排放量大小依次为：双季稻的晚稻稻田>双季稻的早稻稻田>单季稻稻田>稻麦轮作的晚稻稻田。可以看出，稻麦轮作可以显著减少稻田 CH_4 的排放。

2.2　水分管理对稻田 CH_4 全球增温潜势的影响

2.2.1　对早稻田 CH_4 的全球增温潜势的影响

稻田 CH_4 的产生和排放与土壤水分状况密切相关，稻田在晒田落干期间，土壤由嫌气转为好气，显著促进氮素的硝化作用。

按照水分管理方式，将收集到的稻田 CH_4 的数据分为持续淹水(CF)、淹水-晒田-复水-落干(简称晒田，FDF)、淹水-晒田-干湿交替-落干(简称干湿交替，FD)和控制灌溉(CI)4 个亚组。由图 4 和表 3 可以看出，不论 SOM≤30 g·kg^{-1}还是 SOM>30 g·kg^{-1}，稻田 CH_4 的排放量均为持续淹水(CF)>晒土(FDF)>干湿交替(FD)>控制灌溉(CI)。土壤有机质背景值对稻田 CH_4 排放影响明显。当土壤有机质含量低时，稻田 CH_4 的增温潜势也较低，当 SOM 背景值≤30 g·kg^{-1}时，各灌溉模式的 CH_4 增温潜势分别降低 25%、12%、45%和 39%，其中 FD 和 CI 减排显著。淹水条件下稻田 CH_4 排放量最高，中期晒田或间歇灌溉能够显著降低 CH_4 的排放。总体来讲，早稻稻田温室气体全球增温潜势按 CF、FDF、FD 和 CI 的顺序呈现规律性的递减(表 3)。所以控制灌溉是稻田温室气体减排的最有效措施。

表 2　不同肥料类型及土壤改良剂处理下不同有机质水平稻田 CH_4 日排放量中值
Table 2　Middle values of CH_4 daily emission from paddy field with different soil organic matter levels under application of different fertilizer types and soil conditioner　　$kg(CH_4)\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$

土壤有机质水平 Soil organic matter level ($g\cdot kg^{-1}$)	稻季 Rice season	氮肥 Nitrogen fertilizer	配施有机肥 Manure	秸秆还田 Straw turnover	添加生物炭 Biochar
≤2.5	早稻 Early rice	1.61	1.83	2.49	—
	晚稻 a Later rice a	2.44	2.98	3.80	—
	晚稻 b Later rice b	0.55	0.99	1.83	1.11
	单季稻 Single cropping rice	0.78	1.54	2.99	1.61
>2.5	早稻 Early rice	1.57	2.28	3.45	1.02
	晚稻 a Later rice a	2.21	—	3.53	0.52
	晚稻 b Later rice b	0.98	1.18	1.86	0.48
	单季稻 Single cropping rice	1.09	2.70	6.19	0.93

a: 双季稻; b: 稻麦轮作。a: double cropping rice; b: rice-wheat rotation.

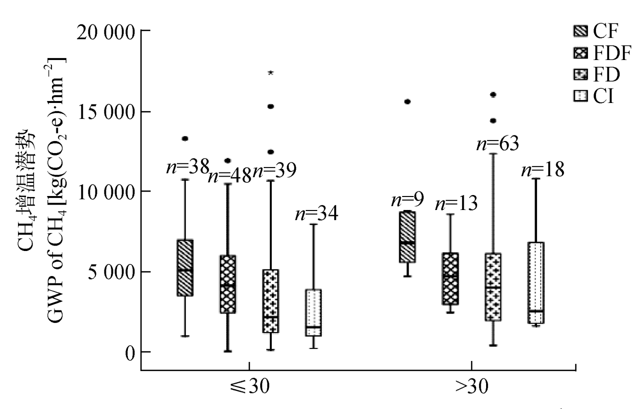


图 4　不同有机质水平早稻田水分管理对 CH_4 增温潜势的影响
Fig. 4　Effect of water management on global warming potential (GWP) of CH_4 from early paddy field of double cropping rice with different soil organic matter levels

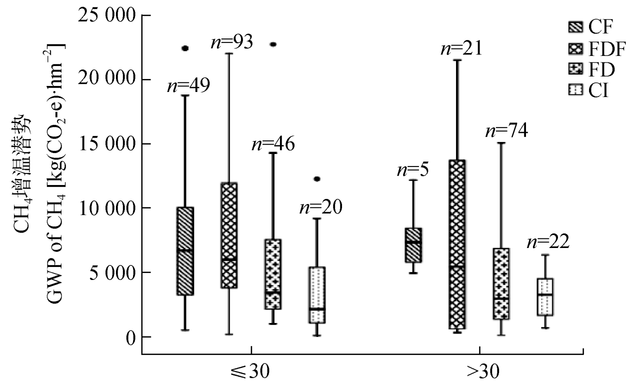


图 5　不同有机质水平晚稻田(双季稻)水分管理对 CH_4 增温潜势的影响
Fig. 5　Effect of water management on global warming potential (GWP) of CH_4 from late paddy field of double cropping rice with different soil organic matter levels

2.2.2　对晚稻田 CH_4 排放的综合影响

相比早稻田，双季稻的晚稻田各灌溉模式下 CH_4 的增温潜势较高。这主要是由于晚稻生育期气温和土温都较高，土壤中碳、氮转化过程及强度均比较活跃而导致。

由图 5 和表 3 可知, 双季稻晚稻田 CH_4 增温潜势随水分管理方式不同而不同, SOM 背景值≤30 g·kg^{-1}时, CF 的 CH_4 增温潜势最高，中值为 6 700.00 kg(CO_2-e)·hm^{-2}, FDF、FD 和 CI 分别较 CF 减排 11%、49%和 68%。SOM 背景值>30 g·kg^{-1}时, CF 的 CH_4 增温潜势中值为 7 362.67 kg(C)·hm^{-2}, FDF、FD 和 CI 的 CH_4 增温潜势分别较 CF 低 26%、60%和 56%, 其中 CI 模式比 FD 模式排放略高，但无显著差异。可以认为，土壤有机质对晚稻田 CH_4 排放无明显影响。

由图 6 和表 3 可知，在稻麦轮作的晚稻田中，SOM 背景值≤30 g·kg^{-1}时，稻田 CH_4 全球增温潜势普遍较低，且按 CF、FDF、FD 和 CI 的顺序递减，但不同水分管理模式下稻田 N_2O 的增温潜势则依次升高，分别占总全球增温潜势的 1%、3%、13%和 50%。可见，控制灌溉时稻田 CH_4 排放降低，而 N_2O 排放却明显增加，这主要因为控制灌溉保持田间湿润无水层或整个生育期保持干湿交替的状态，破坏了产 CH_4 菌适宜的厌氧环境，营造了硝化反应产生 N_2O 的有利环境。不过，与增加的 N_2O 排放相比，减少的 CH_4 排放份额大得多，因此控制水分管理能降低稻田温室气体增温潜势，是稻田温室气体减排的最有效措施之一。

在 SOM 背景值>30 g·kg^{-1}时, CH_4 增温潜势显著增高，可能由于稻麦轮作中上一季的小麦秸秆还田增加了外源有机物质，秸秆碳成为 CH_4 产生的主要基质供应，在厌氧条件下迅速被产 CH_4 菌等微生物利用，产生和排放更多的 CH_4，最终导致稻田 CH_4 排放显著增加。而在同样条件下，稻田 N_2O 增温潜势则

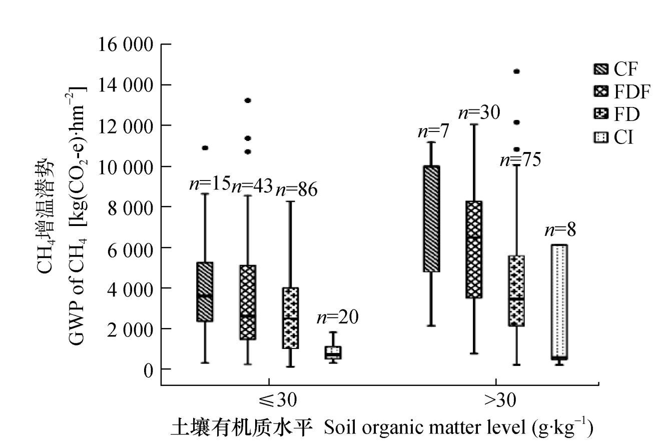


图 6　不同有机质水平晚稻田(稻麦轮作)水分管理对 CH_4 增温潜势的影响

Fig. 6　Effect of water management on global warming potential (GWP) of CH_4 from late paddy field of rice-wheat rotation with different soil organic matter levels

有的增加有的减少，目前还没有较为一致的解释。

2.2.3　对单季稻稻田 CH_4 增温潜势的影响

在 SOM 背景值≤30 g·kg^{-1} 时，FDF、FD 和 CI 的 CH_4 增温趋势分别比 CF 降低 281.89 kg(C)·hm^{-2}、912.39 kg(C)·hm^{-2} 和 2 887.89 kg(C)·hm^{-2}，CH_4 减排比例分别为 7%、25%和 81%，CH_4 排放对稻田总增温潜势的贡献率分别为 95%、94%、91%和 42%，依然是稻田排放的主要温室气体。SOM 背景值>30 g·kg^{-1} 时，各水分管理模式下的全球增温潜势、CH_4 排放特征与 SOM 背景值≤30 g·kg^{-1} 时趋势保持一致，且稻田 CH_4 增温潜势分别增加 47%、55%、29%和 95%，控制灌溉模式下全球增温模式较其他 3 组灌溉模式降低的更多，有明显的减排作用(图 7)。

对于 CF、FDF、FD 和 CI 各个处理，在减少 CH_4 排放的同时，相应的 N_2O 排放比例依次增加，分别为 5%、6%、9%、58%(SOM≤30 g·kg^{-1})和 2%、2%、10%、29%(SOM>30 g·kg^{-1})，但稻田温室气体总全球增温潜势依然是控制灌溉处理最低。

总体来讲，单季稻稻田温室气体全球增温潜势随 CF、FDF、FD 和 CI 的顺序依次递减(表 3)。控制水分管理是稻田温室气体减排的有效措施，与持续淹水比较，其他各种控制灌溉处理中，单季稻稻田温室气体减排量为 3%~64%，其中，控制灌溉的减排效果最好。

表 3　不同灌溉模式下不同有机质水平稻田 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势中值(GWP)

Table 3　Middle values for global warming potential (GWP) of CH_4 and N_2O under different irrigation models from paddy field with different soil organic matter (SOM) levels　　kg(CO_2-e)·hm^{-2}

稻季 Rice season	灌溉模式 Irrigation model	SOM≤30 g·kg^{-1}			SOM>30 g·kg^{-1}		
		CH_4	N_2O	总计 Total	CH_4	N_2O	总计 Total
早稻 Early rice	CF	5 085.00	61.73	5 146.73	6 807.50	47.68	6 855.18
	FDF	4 150.00	90.89	4 240.89	4 702.50	122.18	4 824.68
	FD	2 196.25	112.97	2 309.22	4 017.00	103.02	4 120.02
	CI	1 539.25	134.60	1 673.85	2 541.25	134.10	2 675.35
晚稻 Later ricea	CF	6 700.00	107.28	6 807.28	7 362.67	79.61	7 442.28
	FDF	5 992.50	110.11	6 102.61	5 427.50	81.97	5 509.47
	FD	3 419.75	124.35	3 544.10	2 957.50	187.31	3 144.81
	CI	2 125.00	145.87	2 270.87	3 266.25	287.57	3 553.82
晚稻 Later riceb	CF	3 591.00	57.05	3 648.05	9 970.00	92.98	10 062.98
	FDF	2 601.72	103.89	2 705.61	6 470.10	533.85	7 003.95
	FD	2 495.00	383.99	2 878.99	3 435.00	552.58	3 987.58
	CI	684.95	691.69	1 376.64	562.13	560.54	1 122.67
单季稻 Single cropping rice	CF	3 583.14	199.04	3 782.18	5 278.75	88.51	5 367.26
	FDF	3 301.25	198.08	3 499.33	5 130.00	79.40	5 209.40
	FD	2 670.75	241.28	2 912.03	3 463.75	388.68	3 852.43
	CI	695.25	980.00	1 675.25	1 356.51	557.26	1 913.77

a: 双季稻; b: 稻麦轮作。a: double cropping rice; b: rice-wheat rotation.

3　讨论

本研究结果表明，稻田 CH_4 日排放量和增温潜势均随土壤有机质背景含量的升高而增加，不同类型稻田 CH_4 日排放量大小依次为：双季稻晚稻>双季稻早稻>单季稻>稻麦轮作晚稻，晚稻田 CH_4 增温潜势大于早稻田。不同肥料处理条件下，稻田 CH_4 日排放量表现为：秸秆还田>配施有机肥>化学氮肥≈生物炭。控制灌溉水量可降低稻田 CH_4 的综合增温

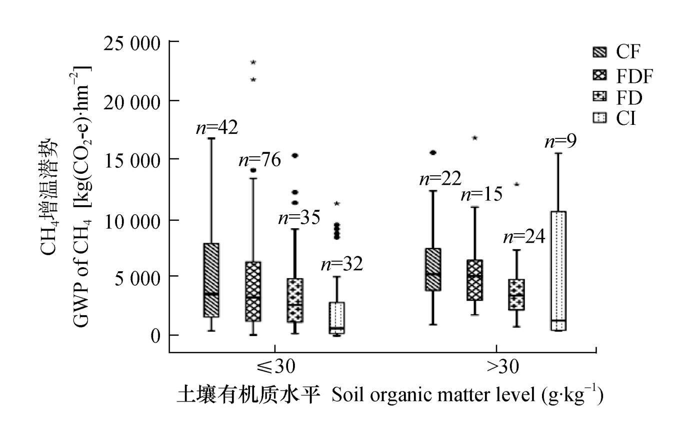


图 7　不同有机质水平单季稻稻田水分管理对 CH_4 增温潜势的影响

Fig. 7　Effect of water management on global warming potential (GWP) of CH_4 from single cropping rice field with different soil organic matter levels

潜势, 表现为: 持续淹水>晒田>干湿交替>控制灌溉。研究结果说明, 稻田 CH_4 的产生与排放过程受土壤有机质含量、肥料管理和水分管理以及轮作制度等多种因素的共同影响, 应依据不同土壤条件和种植制度, 并适当调整肥水管理, 以减少稻田温室气体排放, 使其增温潜势达到最低。

3.1　不同类型稻田 CH_4 排放量分析对比

单施化肥、配施有机肥和秸秆还田处理下, 晚稻田 CH_4 日排放量平均比早稻田高 0.5 倍。这可能由于晚稻生长季内温度高于早稻所致。晚稻生长季内温度高, 土壤微生物更为活跃, 有机物质或土壤有机碳的分解速率加快, 产生的 CH_4 日排放量更多。相比之下, 稻麦轮作各施肥类型的稻田 CH_4 日排放量比双季稻早稻和晚稻都低, 在单施化肥、配施有机肥、秸秆还田处理下分别比早稻平均低 51%、47%和 36%, 较晚稻平均低 66%、66%和 59%。需要注意的是, 本文中单季稻样本量偏低, 其排放值的精度有待于进一步验证。土壤有机质含量不同, 稻田 CH_4 日排放量也存在差异。随土壤有机质含量升高, 晚稻田 CH_4 排放没有显著变化; 而早稻田、稻麦轮作稻季和单季稻田均有明显升高[27-28]。土壤 SOM 背景值较高时(SOM>25 g·kg^{-1}), 单施化肥、配施有机肥和秸秆还田各处理的 CH_4 日排放量均比 SOM 背景值低(SOM≤25 g·kg^{-1})时有所增加。各处理下单季稻田 CH_4 日排放量增加显著。

3.2　肥料管理对稻田 CH_4 排放的影响

肥料特别是有机肥料的施用是稻田 CH_4 排放的一个重要影响因素。不同种类的肥料在不同类型的稻田中, 对 CH_4 排放的影响也不同。本研究表明, 配施有机肥和秸秆还田, 均不同程度增加了稻田 CH_4 日排放量。各处理下稻田 CH_4 日排放量表现为秸秆还田[1.83~3.45 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}]>配施有机肥[0.99~2.98 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}]>氮肥[0.55~2.44 kg(CH_4)·hm^{-2}·d^{-1}]。这是由于秸秆还田后秸秆中的碳(主要为粗纤维、纤维素、半纤维素和木质素)向土壤中提供了有机物质, 为 CH_4 生成提供了物质基础, 促进了稻田 CH_4 的产生和排放[27-28]。有机肥中也有相当数量的易于被微生物利用的碳(如有机酸、氨基糖等)和腐殖酸, 可激活土壤微生物的活性, 促进产 CH_4 菌的活性, 因而促进 CH_4 排放[29-30]。本文涉及的有机肥多是农家肥如猪粪、牛粪, 含有大量活性强、易于被微生物利用的成分, 促进了土壤有机碳的分解矿化, 在嫌气条件下产生 CH_4 的比率也增加。

与配施有机肥和秸秆还田处理相比, 添加生物炭的稻田 CH_4 日排放量显著降低; 但与单施化学氮肥处理相比, 减排效果只对双季稻有一定作用, 而在单季稻中未有显示。这可能是由于双季稻田淹水时间较长, 土壤氧化还原电位(Eh)大部分时间较低, 生物炭本身有一些官能基团(如–OH、–CH_2–、C=C、酯基 C=O)及其灰分中含有 K、Na、Ca、Mg 等盐基离子, 会改善土壤的强还原状况, 可能对甲烷产生有一定的抑制作用[31-32]。单季稻稻田淹水时间较短, 土壤还原状况相对较弱, 导致生物炭的改良作用效果较小, 对 CH_4 产生的抑制作用也较小。由于收集到的生物炭对稻田 CH_4 排放的影响文献有限, 需进一步验证。

3.3　水分管理对稻田 CH_4 全球增温潜势的影响

水分管理不仅控制稻田土壤的好气和嫌气状况, 而且对稻田土壤碳、氮循环有直接影响, 对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的此消彼长和全球增温潜势也有直接影响。分析表明, 不同水分管理下的稻田 CH_4 增温潜势表现为: CF>FDF>FD>CI, 其中晚稻田 CI 模式比 FD 的增温潜势中值略高, 但整体数值呈下降趋势。稻田全球增温潜势整体表现为: CF>FDF>FD>CI。稻田 CH_4 对温室效应的贡献率平均高达 90%以上(范围为 50%~99%), 依然是稻田温室气体排放的主要形式。晒田处理一般在排水条件较好的地区、在水稻分蘖后期进行 1~2 周, 此时由于土壤由嫌气转为好气, 硝化作用开始进行, 分蘖期施用的未被作物及时吸收的氮素即在硝化作用过程中释放出 N_2O。尽管 N_2O 的全球增温潜势高于 CH_4, 但晒田控制在一定时间内, 产生的 N_2O 全球增温潜势占生育期内总全球增温潜势的比例仍较小(2%~58%)[16-17,27]。因此, 一定条件下的排水晒田仍然是稻田温室气体减排的主要措施之一。就我国目前水稻主产区的排水条件

而言，控制灌溉所需的人力、物力比较大，所以该措施还没有广泛推行，而常见的水分管理模式依然是 FDF 或 FD，中期晒田依然是较为简单易行的稻田温室气体减排措施。

参考文献 References

[1] IPCC. Summary for policymakers[M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2013

[2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013
Compiled by National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013

[3] Dannenberg S, Conrad R. Effect of rice plants on methane production and rhizospheric metabolism in paddy soil[J]. Biogeochemistry, 1999, 45(1): 53–71

[4] 张贺, 郭李萍, 谢立勇, 等. 不同管理措施对华北平原冬小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 653–659
Zhang H, Guo L P, Xie L Y, et al. The effect of management practices on the emission of CO_2 and N_2O from the winter wheat field in North China Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(3): 653–659

[5] Chanton J P. The effect of gas transport on the isotope signature of methane in wetlands[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(5): 753–768

[6] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 663–669
Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, et al. Advances in the research on methane emission from paddy fields and its affecting factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(5): 663–669

[7] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil[J]. Plant and Soil, 1986, 92(2): 223–233

[8] 贾仲君, 蔡祖聪. 水稻植株对稻田甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2049–2053
Jia Z J, Cai Z C. Effects of rice plants on methane emission from paddy fields[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 2049–2053

[9] Schutz H, Seiler W, Conrad R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields[J]. Siogeochem, 1990, 11(2): 77–95

[10] Wang Z P, DeLaune R D, Patrick W H, et al. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(2): 382–385

[11] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, et al. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates[J]. Plant and Soil, 1998, 203(2): 227–237

[12] Yao H, Conrad R, Wassmann R, et al. Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy[J]. Biogeochemistry, 1999, 47(3): 267–293

[13] Sebacher D I, Harriss R C, Bartlett K B, et al. Atmospheric methane sources: Alaskan tundra bogs, an alpine fen, and a subarctic boreal marsh[J]. Tellus B, 1986, 38(1): 1–10

[14] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 稻田土壤理化特性对 CH_4 排放的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 27–29
Jiang J Y, Huang Y, Zong L G. Influence of paddy soil properties on CH_4 emissions[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(1): 27–29

[15] Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from a rice-wheat rotation as affected by crop residue incorporation and temperature[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(5): 691–698

[16] 商庆银, 杨秀霞, 成臣, 等. 秸秆还田条件下不同水分管理对双季稻田综合温室效应的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(2): 181–190
Shang Q Y, Yang X X, Cheng C, et al. Effects of water regime on yield-scaled global warming potential under double rice-cropping system with straw returning[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(2): 181–190

[17] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH_4 排放规律的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 9–13
Peng S Z, Li D X, Xu J Z, et al. Effect of water-saving irrigation on the law of CH_4 emission from paddy field[J]. Environmental Science, 2007, 28(1): 9–13

[18] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 216–224
Qin X B, Li Y E, Wan Y F, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH_4 and N_2O emission from double rice field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 216–224

[19] Xu Y, Ge J Z, Tian S Y, et al. Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 1043–1052

[20] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 294–298
Tian G M, He Y F, Li Y X. Effect of water and fertilization management on emission of CH_4 and N_2O in paddy soil[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 294–298

[21] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 中国稻田 CH_4 和 N_2O 排放及减排整合分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2923–2936
Shi S W, Li Y E, Liu Y T, et al. CH_4 and N_2O emission from rice field and mitigation options based on field measurements in China: An integration analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2923–2936

[22] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 21–24
Jiao Y, Huang Y, Zong L G, et al. Impact of different levels

of nitrogen fertilizer on CH_4 emission from different paddy soils[J]. Environmental Science, 2005, 26(3): 21–24
[23] Minamikawa K, Sakai N, Hayashi H. The effects of ammonium sulfate application on methane emission and soil carbon content of a paddy field in Japan[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 107(4): 371–379
[24] Yang X, Shang Q, Wu P, et al. Methane emissions from double rice agriculture under long-term fertilizing systems in Hunan, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 137(3/4): 308–316
[25] 徐玉秀，郭李萍，谢立勇，等．中国主要旱地农田 N_2O 背景排放量及排放系数特点[J]．中国农业科学，2016，49(9): 1729–1743
Xu Y X, Guo L P, Xie L Y, et al. Characteristics of background emissions and emission factors of N_2O from major upland fields in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1729–1743
[26] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group Ⅲ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007: 63–67
[27] Zhang Y F, Sheng J, Wang Z C, et al. Nitrous oxide and methane emissions from a Chinese wheat-rice cropping system under different tillage practices during the wheat-growing season[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 261–269
[28] 张玉铭，胡春胜，张佳宝，等．农田土壤主要温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]．中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966–975
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2, CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966−975
[29] 路丹，何明菊，区惠平，等．耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响[J]．土壤通报，2014, 45(5): 1144–1150
Lu D, He M J, Ou H P, et al. Effects of tillage patterns on the labile organic carbon components, organic carbon mineralization and humus characteristics in paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1144–1150
[30] 王美丽，李军，朱兆洲，等．土壤溶解性有机质的研究进展[J]．矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(3): 304–310
Wang M L, Li J, Zhu Z Z, et al. Advances in research on dissolved organic matter in soils[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2010, 29(3): 304–310
[31] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of Biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105–112
[32] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235–246